

Le Bulletin d'Information de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique

Le Secrétaire de l'AIHS croit répondre à l'attente de ses collègues en les tenant au courant des travaux des organisations qui travaillent en coopération avec l'AIHS ou qui ont leur activité dans des domaines connexes et ont exprimé le vœu d'entretenir certaines relations avec elle.

Dans le numéro de juin dernier nous avons rendu compte des travaux de l'Expédition Glaciologique Internationale au Groenland (EGIG). Dans le numéro présent, nous donnons le compte-rendu de la réunion suivante:

celle de l'Organisation Internationale de Standardisation—sous-comité de la mesure des débits des fluides en canaux ouverts; ce compte-rendu nous donne l'occasion d'exposer le point de vue de l'Association sur ce problème;

Pour terminer, nous publions une étude de notre collègue Mr. H. E. HURST: 'The problem of long-term storage in reservoirs'. Nos lecteurs en prendront certainement connaissance avec le plus grand intérêt.

STANDARDISATION DES MESURES DES DÉBITS DES FLUIDES EN CANAUX DÉCOUVERTS PAR L'INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (ISO)

Rapport du Prof. L. J. TISON, Secrétaire de l'AIHS

En novembre 1955, l'AIHS était saisie d'une proposition de standardisation des mesures des débits fluides en canaux découverts. Cette proposition émanait d'un sous-comité de l'ISO, sous-comité dépendant lui-même d'un comité de mesures des débits fluides qui ne s'est occupé jusqu'à présent que des mesures des débits en conduites.

La proposition initiale fut suivie de l'envoi de notes techniques devant servir de base à la discussion des standards proposés. Ces notes étaient envoyées:

- (a) par le Comité Indien (cette note était fortement influencée par un travail de l'ECAFE);
- (b) par le Comité Allemand;
- (c) par le Comité Français qui annexait à sa note diverses normes établies par la Société Hydrotechnique de France.

Le programme assigné par l'ISO à son sous-comité pour la mesure des débits des fluides en canaux découverts est précisé par le chapitre A, Programme, de la présente note.

L'envoi de la proposition de l'ISO était accompagné d'une invitation adressée à l'AIHS de participer aux travaux du sous-comité dont il vient d'être question, à Munich du 9 au 14 juillet 1956.

Lors de ses Assemblées précédentes, l'AIHS s'était élevée contre certaines intrusions de diverses organisations dans son domaine scientifique. Aussi, le Secrétaire de l'Association, après consultation du Président et de M. SCHIJF, Président de la Commission des Instruments et Mesures, estima-t-il nécessaire de se mettre en rapport avec diverses personnalités de l'Association particulièrement au courant de ces questions et il en résulta une sorte d'enquête, assez limitée sans doute, du fait de la nécessité de faire vite.

Les résultats de cette enquête permirent d'établir le point de vue de l'AIHS qui est exposé dans le chapitre B de ce rapport. Cet exposé arrive à la conclusion que la standardisation proposée n'est pas possible, que certaines 'recommandations' sont peut-être souhaitables, mais dans des conditions telles que leur établissement n'est pas du domaine de l'ISO.

Ce point de vue a été porté à la connaissance du Comité de l'ISO et le Secrétaire de l'AIHS s'est rendu à Munich pour y présenter la façon dont l'AIHS envisage le problème. On verra au chapitre D que le point de vue de l'AIHS n'a pas été discuté à Munich, cette question relevant, paraît-il, de la compétence du Conseil de l'ISO. On y lira les résultats des longues et, à notre avis, assez peu productives, journées de travail.

Le sous-comité avait constitué trois groupes de travail dont les comptes-rendus et les résolutions sont reprises au chapitre indiqué. On s'est borné à établir des plans de travail et des divisions en chapitres, à assurer la nécessité de présenter des formules tenant compte des lois de l'hydraulique et notamment de la similitude. Les divers groupes de travail se sont sans doute préoccupés du côté *mécanique* de la question, mais le côté *hydrologique*, dont nous avons souligné toute l'importance dans l'exposé de notre point de vue, n'a été retenu qu'accessoirement: ce fait ne peut surprendre si on se rappelle que le Sous-Comité des Mesures en Canaux Ouverts n'est qu'une émanation (comprenant souvent les mêmes personnes) du Comité des Mesures en Conduites, problème où l'aspect mécanique est évidemment primordial.

Nous estimons que dans ces conditions, les normes que le sous-comité de l'ISO finira peut-être par présenter quelque jour, ne pourront avoir qu'un intérêt assez réduit pour ceux qui s'occupent des rivières naturelles. Il nous appartiendra cependant de veiller à ce que semblables normes ne puissent être rendues applicables au domaine qui nous intéresse que si on se décide à les considérer sous l'angle hydrologique, pour autant que la chose soit possible.

A. PROGRAMME

ISO SUBCOMMITTEE 1 (LIQUID-FLOW MEASUREMENTS IN OPEN CHANNELS)
OF ISO TECHNICAL COMMITTEE 30 (MEASUREMENT OF FLUID FLOW) *

1. The scope of work of the subcommittee as approved by ISO/TC 30 and the ISO General Council is as below.

*Secretariat: Indian Standards Institution, 19 University Road, Civil Lines, Delhi 8, India.

Rules and methods for the measurement of liquid flow in open channels and waterways by means of the devices enumerated below:

Sectional area measuring procedures

Velocity rods

Pitot tubes

Current meters (both vane and cup type)

Notches and weirs

Standing wave flumes

Modules

specifying for each of the above devices:

terminology and definitions;

rules for inspection; installation, operation;

when intended, construction as well as possible error;

conditions under which measurements are to be made;

rules for collection, evaluation, and interpretation of measurement data;

construction of instruments and equipment.

2. The membership of the subcommittee is as follows:

'P' members

Germany, Italy, UK, France, Belgium, Rumania, USSR, and India (Secretariat).

'O' members

Austria, Czechoslovakia, Yugoslavia.

The following countries have not replied in regard to their interest in the subcommittee work:

Australia, Chile, Denmark, Portugal, Hungary, Israel, Japan, Mexico, Netherlands, New Zealand, Poland, Switzerland, Sweden, Spain, South Africa, and USA.

B. POINT DE VUE DE L'AIHS SUR LA STANDARDISATION DES MESURES DES DÉBITS DES FLUIDES DANS LES CANAUX A CIEL OUVERT

L'ISO a estimé pouvoir entreprendre une discussion relative à la standardisation des mesures des débits des fluides dans les canaux à ciel ouvert.

M. CHANDRASEKHARA a bien voulu envoyer une série de documents préparatoires à la discussion, tandis que les comités français et allemands ont présentés à leur tour des documents pouvant également servir de base au débat.

D'un autre côté l'ISO a estimé que certaines organisations internationales pouvaient apporter à l'étude de cette question les résultats de leurs travaux: c'est ainsi que l'AIHS, une des associations constitutives de l'UGGI (créée en 1921) a été priée d'envoyer un observateur à la réunion de Munich. L'AIHS m'a chargé en tant que secrétaire général d'être cet observateur.

Il m'a tout d'abord paru utile, si pas nécessaire, de rappeler brièvement le travail fait par notre Association dans le domaine de la mesure des débits des liquides et surtout ses projets en voie de réalisation, qui ont fait apparaître l'énormité de la tâche.

1. *L'étude des mesures des débits liquides en canaux découverts, au sein de l'AIHS*

L'Association avait confié, dès son Assemblée de Madrid en 1933, l'étude de ce problème à une commission spéciale qui fut présidée par M. Jean LAURENT (France). Une série de rapports furent présentés à l'Assemblée d'Edimbourg (1936) et à celle de Washington (1939): certains des travaux présentés sortaient même du cadre de l'hydrologie et s'intéressaient notamment aux mesures en conduites. La Commission avait compté pouvoir tirer certaines conclusions à l'Assemblée de Washington mais l'ouverture des hostilités au cours de l'Assemblée interrompit les discussions.

Les travaux de l'AIHS ne devaient être repris que par l'Assemblée d'Oslo en 1948. La question des mesures ne fut même reprise qu'à l'Assemblée de Bruxelles en 1951 où fut créé un comité permanent chargé de l'étude des instruments et de leur utilisation: la présidence en a été confiée à M. SCHIJF du Waterstaat des Pays-Bas.

L'AIHS groupe actuellement pratiquement toutes les nations du monde et certainement toutes celles qui s'occupent sérieusement de la mesure des débits liquides. Le Comité de M. Schijf a des représentants dans tous les pays. Ils sont chargés de rassembler les résultats dans leur pays en suivant un programme établi par M. Schijf et approuvé à l'Assemblée de Rome.

Le Comité en question a rassemblé un certain nombre de résultats qui seront publiés par l'Association. Le travail est actuellement en très bonne voie, mais il est considérable: c'est peut-être ce qui a été le mieux mis en relief par le travail exécuté à ce jour depuis 1951. Il est à remarquer que le travail entrepris est une étude *scientifique* des instruments et de leur utilisation.

2. *La position de l'AIHS vis à vis des projets de standardisation*

Cette position a été examinée à la suite de l'étude des documents qui nous ont été transmis par le Secrétariat (Indes) et notamment par la lettre ISO/TC 30 SC-1 du 30 janvier 1956 de l'Indian Standards Institution et des documents qui nous ont été transmis ultérieurement par le Secrétariat Général. Dès l'origine, il nous a semblé:

- (a) Que la mesure des débits des cours d'eau est un domaine excessivement vaste nécessitant de multiples appareils et méthodes qui, avouons-le, ne peuvent assurer une bien grande exactitude dans les conditions habituelles et qui se perfectionnent sans cesse; une standardisation dans ces conditions nous apparaît comme étant de nature à compromettre cette amélioration continuelle.
- (b) Qu'il serait bien difficile d'imaginer une standardisation des appareils (moulinets, tube de Pitot, etc.), alors que le programme qui nous a été transmis envisage bien la standardisation de la construction des instruments et de leur équipement.
- (c) Que si la standardisation des mesures en conduites par appareils déprimogènes se comprend et, disons-le même, s'impose, il n'en est certainement pas de même pour les cours d'eau.

Les coefficients intervenant dans toute mesure sont fonction de mille

détails de réalisation du dispositif de mesure, détails qu'il est en général aisé de réaliser dans les appareils déprimogènes.

Au contraire, il ne peut être question d'imposer ces précisions d'établissement dans les dispositifs de mesures des cours d'eau, dispositifs qui sont ou bien existants ou bien qu'il faut établir en tenant compte des conditions naturelles de la rivière.

Considérons par exemple des mesures comme celles envisagées par les déversoirs et les systèmes analogues. Même dans le cas le plus simple, le mieux connu, celui des déversoirs rectangulaires, en mince paroi, avec nappe libre, on présente de 3 à 4 formules (pour ne parler que des principales), qui pour les mêmes conditions, donnent des résultats différant parfois de 5 pour cent et cela pour des applications dans des conditions idéales (laboratoires ou rigoles expérimentales). Les normes nationales que l'on a essayé d'établir dans ce domaine parlent d'autre part de l'influence possible de mille facteurs (que nous ne pouvons citer dans cette étude générale), mais qu'on n'a généralement pas essayé de chiffrer.

Que dire dans ces conditions, des autres nappes toujours plus ou moins instables, des nappes noyées insuffisamment étudiées jusqu'à présent, des déversoirs triangulaires, trapézoïdaux ou autres, dont les formules présentées ne sont qu'apparemment simples et manquent souvent d'exactitude. Nous n'avons pris ce cas des déversoirs que comme exemple, mais on pourrait en dire autant des autres méthodes.

En un mot disons que nous estimons que l'étude scientifique de la plupart des dispositifs et instruments de mesure pour les cours d'eau n'a pas atteint des résultats permettant de parler de standardisation.

- (d) Qu'on peut même se demander s'il ne faut pas aller plus loin: la mesure du débit d'un cours d'eau ne constitue-t-elle pas la plupart du temps une opération quasi unique, influencée par tant de facteurs qu'il est bien difficile de les faire intervenir tous correctement. On peut sans doute imaginer des méthodes générales, mais leur application exigera souvent l'intervention d'un hydrologue spécialiste qui pourra tenir compte, et encore avec plus ou moins de succès d'après son habileté, des mille influences qu'il est impossible de faire entrer dans une formule.
- (e) Qu'un autre aspect de la difficulté du travail que l'on veut commencer est constitué par le fait que le plus grand nombre des nations, même parmi celles qui sont à la pointe du progrès dans le domaine qui nous intéresse, ne participeront pas de manière effective aux essais de normalisation.

Des nations comme les États-Unis, la Suisse, la Hollande pour ne citer que celles-là, possèdent une expérience dans ce domaine qui ne peut être négligée, précisément alors que l'état d'avancement de la question, même à l'échelon mondial, peut être considéré comme insuffisant.

3. Les considérations que nous venons de résumer, nous les avons émises après conversations avec M. THJSSE (Hollande), président de l'AIHS, et avec M. SCHIJF, président du comité des instruments et mesures de l'AIHS.

Nous avons voulu nous rendre compte si ces vues correspondaient à celles des membres de l'Association, bien que nos vues personnelles n'étaient en fait que la résultante des impressions que nous avons recueillies au cours des discussions de nos assemblées générales.

Le peu de temps dont nous disposions ne nous a pas permis de faire une enquête tout à fait générale, mais nous estimons avoir consulté la plupart des nations qui ont acquis une grande expérience de ces questions.

En général, le ton des réponses est au diapason des considérations que nous venons d'émettre. Disons cependant que certains des avis sont moins absolus et que certains admettent la possibilité d'établissement de certains codes limités. Nous citons la réponse la plus favorable à une codification limitée (M. RÉMÉNIERAS, France):

'J'ai déjà fait observer au Comité français qu'il ne pouvait guère être question de normaliser les instruments de mesure tels que les tubes de Pitot, les moulinets, etc. Par contre, il n'est peut-être pas sans intérêt d'unifier autant que possible les méthodes employées dans divers pays pour l'étalonnage de ces instruments, leur méthode d'emploi dans le cas considéré et les méthodes de dépouillement des mesures. C'est d'ailleurs ce que nous avons fait dans le Code d'essai de la *Société Hydrotechnique de France* que vous connaissez bien. Il ne rentre pas dans les objectifs de l'ISO de procéder à l'étude scientifique des divers instruments ou procédés de mesure, mais simplement de recommander ceux qui paraissent les meilleurs à un moment donné'.

En général, répétons-le, les réponses que nous avons reçues ne vont même pas jusque là et la plupart insistent sur le fait qu'une standardisation n'est guère possible au moins à l'heure actuelle. La plupart des réponses, souvent d'un certain poids, reprennent nos arguments en insistant même sur certains aspects.

Je cite notamment une réponse des États-Unis:

'Instruments and methods of measurement are in constant evolution and improvement, and efforts upon international standardization might tend to retard or arrest this favorable evolution. We would not even favor rigid standardization at the national level in this field (excepting the usual standardized methods for rating or calibrating meters). Methods of measurement of discharge by the use of weirs or slope-area methods, depend on coefficients which are constantly in a state of refinement and are subject to variation on account of local factors such as velocity of approach. However, a handbook or listing of coefficients determined and verified in actual field tests would be useful and valuable. I believe that a considerable amount of preliminary work needs first to be done in exchanging information on field methods and instruments, including means for computing and publishing data. We need to know a good deal more about the several instruments; how they are used in the field and how we handle the field work and process records, before any of us would be in a position intelligently to interpret the other country's codes.'

Le même correspondant rejette même l'idée d'un code et s'exprime ainsi:

'We would be able to supply not what we would like to call a code but rather a manual or description of the methods that we use for discussion and exchange with other countries from which if there is sufficient favorable reaction later to work out some kinds of guides to good field practices, from which an experienced hydrologist could select those best adapted to his local condition.'

En terminant, ce correspondant insiste sur le fait suivant:

'Consideration of river flow problems should be considered from a hydrologic point of view rather than from the limited aspect of mensuration.'

Les considérations émises du côté suisse, italien et même allemand sont assez analogues. Je lis notamment dans une réponse italienne:

'Per quanto riguarda specificatamente il merito della questione ritengo che le misure di portata sui corsi d'acqua, non possano essere standardizzate. Servizi Idrografici, pubblici e privati, potranno per informazione ed istruzione dei propri operatori, diramare delle "raccomandazioni" sul modo di effettuare queste misure, ma da qui ad una generalizzazione dei metodi o anche limitatamente alle sole "raccomandazioni" mi pare che il passo sia troppo lungo, tenuto conto della molteplicità e delle complessità delle situazioni locali, che si presentano nell'effettuazione di una misura di portata. Misura, mi sia concesso dire, che è tuttora forse più un'arte che una tecnica.

Una sola cosa si potrebbe fare, forse, in questo senso, raccomandare che *in nota* sui valori delle misure di portata venisse indicato, come si usa fare in topografia, il metodo e lo strumento usato.'

Du côté allemand, je crois savoir qu'il n'est nullement question de standardiser les instruments et les méthodes de mesures en rivières et canaux, mais qu'il s'agit tout au plus de présenter des recommandations (EMPFEHLUNGEN).

Je pourrais multiplier des citations du même genre de la part de nos délégués suisses et hollandais.

4. *Autres organisations s'occupant du même problème*

(a) *Organisation Météorologique Mondiale*

Il y a quelque temps, les Nations Unies ont chargé l'OMM, organisme gouvernemental, de s'attaquer au problème des 'Ressources hydrauliques' ces mots étant pris dans leur sens le plus large.

L'OMM a estimé nécessaire de se mettre en rapport avec l'AIHS à ce sujet (l'AIHS est un organisme semi-gouvernemental à caractère purement scientifique dépendant de l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique).

Divers échanges de vues ont eu lieu et une réunion est prévue à Genève immédiatement après la présente réunion. J'ai l'impression que la question des mesures hydrologiques constituera un des points importants du travail commun. Il m'a paru bon de signaler la possibilité de voir cette autre organisation gouvernementale s'attaquer aux problèmes qui nous

5. Consideration of First Draft Proposal prepared by the Secretariat on Measurement of Flow of Water through Open Channels using Notches, Weirs, and Flumes.
6. Consideration of First Draft Proposal prepared by the Secretariat on Standard Forms for reading Measurement of Flow of Water in Open Channels.
7. Consideration of German Proposal for Measurement of River Discharges.
8. Future work and date of next meeting.

D. RÉSOLUTIONS ADOPTÉES PAR LA RÉUNION

(a) *Groupe de Travail N° 1. Mesure du débit des liquides en canaux ouverts par les méthodes d'exploration du champ des vitesses*

Le Groupe de Travail N° 1,

1. RECOMMANDE que le groupe soit institué de manière permanente pour poursuivre la normalisation de la mesure du débit des liquides en canaux ouverts par la méthode d'exploration du champ des vitesses,
2. RECOMMANDE que MM. NARASIMHAM (Président), BOURGUIGNON, ESCHWEILER, SPENCER, rédigent de commun accord un projet remanié sur la normalisation de la mesure du débit des liquides en canaux ouverts par la méthode d'exploration du champ des vitesses, projet qui sera distribué au Groupe de Travail N° 1,
3. ESTIME que le document ISO/TC 30 SC 1 (Secretariat 5) 5 peut servir de base à la rédaction du projet remanié,
4. RECOMMANDE que les documents allemand, français, et tous autres documents éventuels soient examinés en détail par les rédacteurs,
5. RECOMMANDE de ne pas inclure le tube de Pitot dans le projet remanié pour les mesures de débit en rivière,
6. RECOMMANDE de ne pas inclure dans le programme remanié la méthode de détermination du débit à partir de l'observation de la pente superficielle,
7. Provisoirement RECOMMANDE que seules soient prises en considération dans le projet remanié les méthodes utilisant les indicateurs de vitesse et les flotteurs (il faut entendre par flotteurs, le flotteur de surface, le flotteur double, le bâton lesté et tous autres appareils similaires),
8. ESTIME que, lorsque des coefficients doivent être introduits dans le projet remanié, il y a lieu de les introduire sous forme de nombres sans dimension,
9. PROPOSE que, lorsque la chose est possible, le projet remanié indique la précision et les tolérances des différentes méthodes.

(b) *Groupe de Travail N° 2. Mesure des débit liquides au moyen de déversoirs, déversoirs à échancrures et canaux jaugeurs.*

Le Groupe de Travail N° 2 a adopté les résolutions suivantes:

- I. Le Programme du Groupe de Travail N° 2 doit être le suivant:

0. Introduction
1. Domaine du Travail
2. Terminologie
3. Equation de l'écoulement
4. Dispositifs hydrauliques type court

A. Déversoirs en mince paroi.

- (a) Rectangulaire, sans contraction latérale
- (b) Rectangulaire, avec contraction latérale
- (c) Triangulaire (échancrure en V)
- (d) Trapézoïdal
- (e) Circulaire
- (f) Composé
- (g) Proportionnel
- (h) Latéral ou oblique

B. Orifices de fond.

5. Dispositifs hydrauliques à type long.

A. Dispositifs à ressaut.

- (a) Contraction inférieure
- (b) Contraction latérale
- (c) Contraction inférieure et latérale

B. Dispositifs à écoulement noyé.

- (a) Seuils noyés
- (b) Canaux Venturi et dispositifs analogues

6. Conditions d'installation et autres facteurs intéressants.

II. L'équation générale de l'écoulement sera établie sur la base de l'analyse dimensionnelle et de la similitude mécanique. De cette équation seront déduites les équations particulières à utiliser pour les différents dispositifs énumérés aux points 4 et 5 du programme faisant l'objet de la Résolution N° 1.

III. Pour certains des dispositifs d'usage courant, il existe à l'heure actuelle des renseignements suffisants pour permettre d'introduire dans le projet des tableaux ou des graphiques concernant le coefficient de débit et fondés sur les conceptions modernes de la mécanique des fluides, comme cela est fait pour la mesure des débits dans les tuyaux. Parmi d'autres, les deux références suivantes peuvent être consultées:

- (i) Flow over sharp-edged Weirs: Effect of thickness of crest, by Professor Alexander HOPE JAMESON (*J. Inst. Civ. Engrs*, Nov. 1948).
- (ii) F. EISNER: Überfallversuche in verschiedner Modellgrösse. Masstab, Einfluss und Auswertungsverfahren (*Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau u. Schiffbau*, Heft 11, Berlin 1933).

IV. Il est recommandé d'établir un Groupe de Travail chargé des travaux suivants:

- (a) Établir l'équation générale de l'écoulement et l'équation particulière à chaque dispositif (Résolution N° 2);
- (b) Assembler, analyser et coordonner les renseignements existants concernant les coefficients de débit (Résolution N° 3) et préparer les tableaux et graphiques adéquats;
- (c) Assembler, analyser et coordonner les renseignements existants concernant les conditions d'installation et les autres facteurs intervenant (Point 6, Résolution N° 1).

Ce Groupe de Travail sera composé de MM.:

A. SCHLAG	A. L. JORISSEN
PALLEZ	F. V. A. ENGEL
BLAU	H. E. DALL
H. L. UPPAL	KARELINE
K. N. KATHPALIA	

Le Groupe de Travail s'adjoindra des membres supplémentaires s'il le juge nécessaire.

V. Une liste de termes avec leurs définitions, concernant la mesure du débit d'eau dans les canaux découverts au moyen de déversoirs, déversoirs à échancrure et canaux jaugeurs, sera préparée par le Groupe de Travail N° 2 et transmise au Groupe de Travail N° 3 pour examen en vue d'être introduite dans le glossaire préparé par ce dernier.*

VI. Le Groupe de Travail N° 2 attire l'attention sur l'importance de la Résolution N° 3, document ISO/TC 30 (Paris 1954-4) 89 E, et rappelle que tous les documents en préparation ne doivent pas se limiter au cas de l'eau pure, mais doivent considérer les liquides en général, particulièrement les solutions et suspensions.

(c) *Groupe de Travail N° 3. Glossaire*

Le Groupe de Travail N° 3 a adopté les résolutions suivantes:

1. RECOMMANDE de ne pas grouper les termes du glossaire dans l'ordre alphabétique, mais de les grouper en sections de sous-sections formées de termes portant sur un sujet commun, comme cela a été fait dans le tableau employé lors des discussions du Groupe de Travail N° 3.
2. RECOMMANDE la constitution d'un Groupe de Travail permanent chargé d'achever le glossaire des termes relatifs aux mesures de débits liquides en canaux découverts, et de le former par un membre nommé par chacun des comités suivants:

Allemagne	France
Belgique	Grande-Bretagne
États-Unis	Inde

*La résolution No 5 adoptée par le Groupe de Travail N° 2 fut communiquée au Groupe de Travail N° 3 qui a accueilli les propositions faites par le Groupe de Travail N° 2 en ce qui concerne les termes et leurs définitions se rapportant aux déversoirs à échancrure et canaux jaugeurs. En vue d'établir une liaison adéquate entre les deux Groupes, le Groupe de Travail N° 3 propose au Groupe de Travail N° 2 de désigner un ou deux membres de ce dernier qui pourraient assister aux séances du Groupe de Travail N° 3 au moment où celui-ci entamera la discussion portant sur les termes concernant les déversoirs, déversoirs à échancrure et canaux jaugeurs.

Le Groupe N° 3 recommande que ce Groupe de Travail se réunisse aussitôt que possible pour compléter le glossaire assez rapidement pour que la proposition complète puisse être mise en circulation au sous-comité avant la prochaine réunion.

Sections du glossaire

A. Termes généraux

1. Généralités
2. Mesures des débits des liquides en canaux ouverts
 - (a) Hauteurs
 - (b) Distances horizontales
 - (c) Surfaces
 - (d) Pentes

B. Méthodes basées sur la détermination des vitesses locales

1. Pitot
2. Moulinets
3. Flotteurs

C. Méthodes donnant immédiatement le débit total

1. Déversoirs
2. Canaux
3. Venturi et dérivés
4. Écrans
5. Méthodes de dilution
6. Orifices noyés

THE PROBLEM OF LONG-TERM STORAGE IN RESERVOIRS

H. E. HURST, C.M.G., M.A., D.Sc., F.Inst.P.,
Scientific Consultant to the Ministry of Public Works, Egypt

I. INTRODUCTION

The use of the water of a river for irrigation so as to extract the maximum benefit requires that the flow of the river shall be regulated by means of reservoirs. The ideal would be that the river should be completely controlled so as to send down a constant annual discharge distributed throughout the year according to the seasonal requirements of the crops.

In the following discussion, which is based on two earlier papers by the author,^{1, 2} seasonal variation of flow and crop requirements within the year are not considered, since only annual totals are used. The effects of these must be considered separately and added to those dealt with here.

Given a series of annual discharges recorded for a past period, it is easy to calculate what storage would have been enough to equalize the flow and send down the mean discharge every year throughout the period. Much more than this is needed, however, before a policy can be laid down for the future, since the past is never exactly repeated.

II. CALCULATION OF STORAGE FROM PAST RECORDS OF PHENOMENA WHEN ALL THE SUPPLY IS USED

Suppose we have a record of the annual discharge of a stream over a number of years, and we assume that it flows into a reservoir of indefinite capacity, from which there is a constant outflow equal to the mean annual discharge. The storage which would have been required to make the annual discharge flow every year is obtained by computing the continued sums of the annual departures from the mean. Then the range R from maximum to minimum of these continued sums is either (a) the maximum accumulated storage when there is never a deficit, (b) the maximum accumulated deficit when

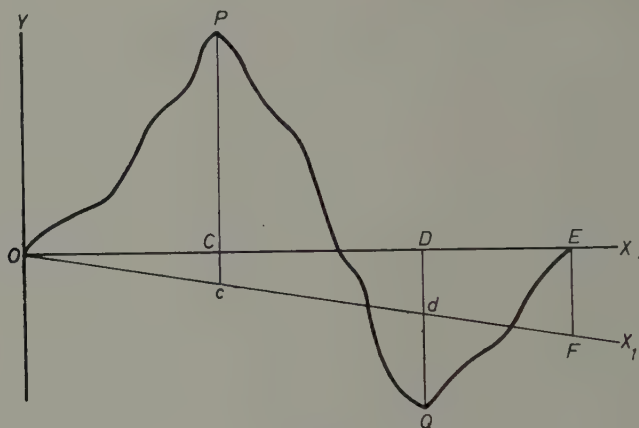


Figure 1.

there is never any storage, or (c) their sum when there is both storage and deficit.

This is shown in Figure 1 where OX is the time axis and OY the axis of accumulated departures from the mean. The curve representing these is $OPQE$, and OE represents N years. During the period OC departures are positive and the initial storage is increased by PC . From C onwards to D departures are negative and the storage is decreased by $PC + DQ$, after which it increases up to the end of the record at E , when the total of departures is zero, and the storage is the same as at the commencement. $PC + DQ = R$, and this amount of storage would have enabled the mean discharge for the period to have been maintained throughout.

It is commonly assumed that the frequency distribution for river flows approximates to the Normal or Gaussian Curve, and this is usually true, but it is only part of the description of the phenomenon, since there is also a tendency for high or low years to be grouped together. A theoretical investigation shows that, if the individual years were entirely independent of each other and the discharges were randomly distributed, the most likely value of R/σ would be given by

$$R/\sigma = \sqrt{(\frac{1}{2}N\pi)} = 1.25\sqrt{N}, \quad (1)$$

where N is the number of years and σ is the standard deviation of the discharges for the period considered. Experiments with random events such as tossing coins agreed with this equation.

Records of the discharges of a number of rivers were examined and R was calculated for as many as were available. Unfortunately, there was no record then of the discharge of a river which covered much more than 70 years, and so R was computed for a number of rainfall records of which several covered more than 150 years. To these were added some records of river levels, temperatures, and pressures. A common feature of all the records was that their frequency distributions, ignoring order of occurrence, were of the humped type approximating to the normal Gaussian curve. When R was plotted against N an elongated group of points was produced represented by the equation

$$R/\sigma = 1.65\sqrt{N}.$$

In this group there was nothing to distinguish one type of phenomenon from another, but it was clear that R increased more rapidly than was the case with random events. This was attributed to the tendency of natural phenomena to have runs when values on the whole were high and others when they were low. Owing to the scatter of the points the length of available records was not great enough to decide whether R/σ for natural phenomena was best represented by the square root or by some other function of N .

In the attempt to settle this point more long-term records of rainfall, temperature, pressure, and lake levels were computed and a search was made for other long-term records of natural phenomena. As a result the analysis was extended to the records of the Roda (Cairo) Nilometer, which carried back with gaps to A.D. 640, the thickness of tree rings which gave records up to 900 years, and varves for which 4,000 years were available.

Altogether 75 different phenomena were used. In the case of tree rings results from 4 different localities were taken separately, and the figures used for each locality are the means of a group of about 10 trees. A record was divided into periods for each of which R/σ was computed. For example, with 120 years recorded computations might be made for 3 periods of 40, two overlapping periods of 80, and the full period of 120 years. In general R was not computed for periods of less than 30 years. Altogether 690 values of R/σ were computed. A preliminary examination of the long-term data showed that R/σ increased more rapidly than \sqrt{N} and less rapidly than N . To find the form of the relation the statistics were divided into sets containing similar phenomena, and the sets again into groups, each group containing a small number of values of R/σ with approximately the same value of N . Table 1 gives the means of R/σ and N for these groups and also their logarithms.

Figure 2 shows $\log R/\sigma$ plotted against $\log N$ where R/σ and N are group means for each set of phenomena.*

* Tables 1 and 2 and Figure 2 are reproduced from ref. 1 by courtesy of the American Society of Civil Engineers.

Table 1. Relation of R/σ and N for groups of phenomena

Phenomena	No. of cases	N years	R/σ	$\log N$	$\log R/\sigma$	K
<i>(a) Group of 99 Cases</i>						
River levels, discharges, and runoff	8	35	7.5	1.54	0.85	0.68
	8	45	8.9	1.65	0.94	0.70
	8	62	13.1	1.79	1.08	0.72
	9	108	16.4	2.02	1.19	0.69
	12	105	19.6	2.02	1.27	0.75
	10	208	36.5	2.32	1.54	0.77
	9	309	53.9	2.49	1.72	0.79
	8	420	60.3	2.56	1.77	0.78
Roda Nilometer	7	511	67.7	2.71	1.82	0.75
	6	613	81.3	2.79	1.89	0.77
	5	716	104	2.85	2.01	0.79
	4	820	122	2.91	2.08	0.80
	3	927	129	2.96	2.11	0.79
	2	1,040	130	3.02	2.12	0.78
Mean of 99 cases	—	—	—	2.28	1.48	0.75
<i>(b) Group of 168 Cases</i>						
Rainfall stations with one value* of R	7	71	14.0	1.82	1.12	0.74
Two groups of values† of R ..	20	48	8.7	1.70	0.92	0.66
	12	98	13.7	1.94	1.11	0.68
Rainfall stations with three groups of values of R ..	66	38	8.2	1.57	0.91	0.72
	38	78	14.4	1.87	1.13	0.72
	25	121	22.2	2.08	1.31	0.74
Mean of 168 cases	—	—	—	1.79	1.08	0.70
<i>(c) Group of 109 Cases</i>						
Temperature and pressure stations with 3 values of R ..	27	37	7.4	1.55	0.85	0.68
	18	73	12.0	1.86	1.06	0.68
	10	110	18.0	2.04	1.24	0.71
Temperature stations with 4 values of R	24	44	8.8	1.63	0.93	0.70
	12	88	15.1	1.94	1.17	0.71
	12	132	21.0	2.12	1.32	0.72
	6	175	27.1	2.24	1.43	0.74
Mean of 109 cases	—	—	—	1.81	1.05	0.70
<i>(d) Group of 85 Cases</i>						
	41	50	13.6	1.69	1.11	0.80
	21	100	26.6	2.00	1.43	0.84
Annual growth of tree rings ..	14	200	45.0	2.30	1.64	0.82
	4	300	79.9	2.48	1.90	0.87
	4	462	76.6	2.66	1.87	0.79
	1	900	187.0	2.95	2.27	0.86
Mean of 85 cases	—	—	—	1.97	1.36	0.80
<i>(e) Group of 90 Cases</i>						
Thickness of annual layers of mud; Tamiskaming, Ont., Canada, and Moen, in the Sogne District, Norway ..	44	50	10.9	1.70	1.02	0.73
	22	100	21.3	2.00	1.31	0.77
	11	200	42.7	2.30	1.58	0.79
	4	300	82.5	2.48	1.90	0.87
	3	400	126	2.60	2.09	0.91
	4	550	115	2.74	2.00	0.82
	2	1,100	181	3.04	2.19	0.80
Mean of 90 cases	—	—	—	1.98	1.30	0.77

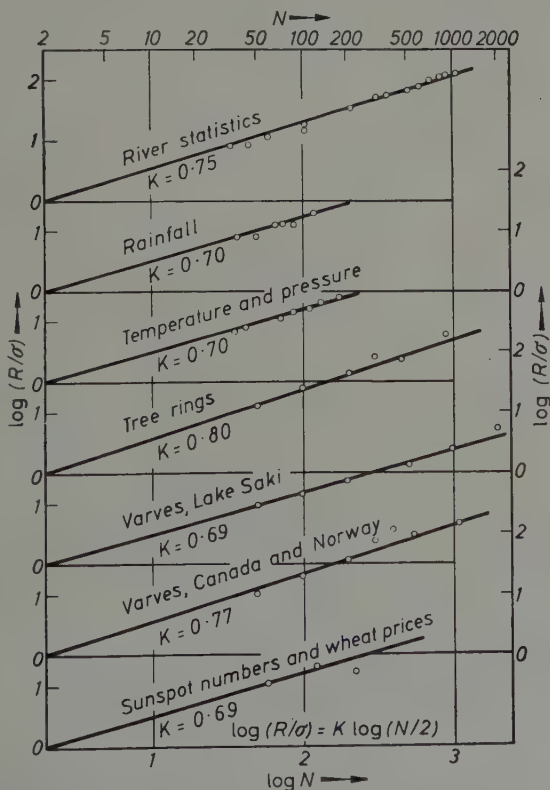
Table 1—continued

Phenomena	No. of cases	N years	R/σ	log N	log R/σ	K
<i>(f) Group of 114 Cases</i>						
Thickness of annual layers of mud, Lake Saki in the Crimea	40	50	9.7	1.70	0.98	0.70
	40	100	15.3	2.00	1.17	0.69
	20	200	25.0	2.30	1.39	0.70
	8	500	47.9	2.70	1.66	0.69
	4	1,000	84.0	3.00	1.91	0.71
	2	2,000	179.0	3.30	2.24	0.75
Mean of 114 cases	—	—	—	2.06	1.22	0.69
<i>(g) Group of 25 Cases</i>						
Sunspot numbers and wheat prices	12	64	12.4	1.77	1.06	0.72
	6	124	22.1	2.09	1.34	0.75
	7	237	16.9	2.36	1.22	0.60
Mean of 25 cases	—	—	—	2.01	1.17	0.69
<i>(h) Group of 259 Cases</i>						
Weight mean of 259 cases† ..	—	97	17.8	—	—	—

* Rainfall stations with one value of R; includes temperature at one station.

† Rainfall stations with two groups of values of R; includes temperature and one pressure.

‡ N ranges from 81 to 120.

Figure 2. Relation between range of summation curve (R), standard deviation (σ), and length of record (N).

The figure shows that there is a linear relation between $\log R/\sigma$ and $\log N$ for each of the sets in which there are enough groups for it to show. R/σ can be found exactly for $N = 2$ and has the value 1. The lines in the figure are therefore drawn through the point (0.30,0) representing this, and through the centres of gravity of the groups of each set. The equations of these lines are

$$\log R/\sigma = K \log N/2 \quad (2)$$

It is clear from the figure that for every set of phenomena a straight line is a good fit, and the remarkable fact appears that K , the slope of a line, varies very little from set to set. Table 2 gives a summary of the mean values of K obtained from the 690 separate values which have been computed.

Table 2
Summary of values of K

Type of phenomenon	No. of phenomena	No. of values of K	Mean	Std devn
River levels, discharges, etc.	18	99	0.75	0.077
Rainfall	30	168	0.70	0.069
Temperature and pressure	19	115	0.70	0.085
Annual growth of tree rings	4	85	0.81	0.078
Varves (Lake Saki in Crimea)	1	114	0.69	0.064
Varves (Tamiskaming, Canada, and Moen, Norway)	2	90	0.77	0.094
Sunspot numbers and wheat prices (combined as miscellaneous)	2	25	0.69	0.086
Means and Totals	76	696	0.729	0.092

The remarkable facts which appear from the analysis of the figures are that a statistical relation of the same form exists for all the classes of phenomena which have been investigated, and that the parameter K in the relation varies very little from one class to another. This justifies the use of the other classes of data to supplement the data from discharge measurements on rivers. Individual values of K have a distribution which is approximately normal. The extreme values are 0.46 and 0.96. Considering the mean values of K for the different classes of phenomena the standard deviation of these means is about 4 times as great as it would be if the distribution of K was entirely random. This indicates that K does vary slightly with different classes of phenomena. Nevertheless it is a striking fact that the variation amongst the classes is so small. The largest mean value of K is 0.81 from tree rings derived from 4 sets of trees in different places whose means are 0.80, 0.81, 0.81, and 0.84. The standard deviation of a mean of 85 values of K on the assumption of a random distribution would be about 0.01, while the departure of the tree-ring mean K from the mean of all values is 0.08. The measurements of thickness of tree-rings, which were for American trees measured by Dr. DOUGLASS, had been adjusted to eliminate as far as possible non-climatic factors, such as more rapid growth

when the tree was young, spread of tree at the base, and more rapid growth of some trees owing to favourable environment. It is possible that this adjustment may be responsible for some of the difference in K .

If this difference is ignored the maximum difference of a group from the mean is still 0.04, which is too large for a random distribution. The conclusion is that on the present data the best value of K to adopt for calculations of reservoir capacity is 0.72, which gives a little more weight to the short-term and more precisely measured quantities—discharge, rainfall, temperature and pressure, of which it is the mean—than to varves and tree rings. We therefore arrive at the equation

$$R/\sigma = (N/2)^{0.72} = 0.61 N^{0.72}$$

as giving the most probable value of R .

It is clear from the above that in regard to the parameter R the natural phenomena so far considered have a similarity amongst themselves but differ from purely chance phenomena. One way in which this difference is shown is that if, for example, we have a record covering several hundred years and this is divided into sets of fifty years, for each of which we calculate the mean and standard deviation, these means and standard deviations are more variable than they would be for a normal Gaussian frequency distribution. Thus if we have a record for 40 or 50 years of the flow of a stream the extreme values which may occur in the future are likely to be greater than would be forecast on the ordinary theory of probability. The idea therefore that 30 or 40 years of observations on a stream give a full representation of what it can do is incorrect.

It is also fallacious to extend a short record of, say, 50 years by constructing a normal frequency curve and using some device of drawing a series of random values based on this curve, such as the author's probability pack of cards,¹ or the similar device described by F. B. BARNES;³ these will give the distribution of R/σ represented by equation (1) instead of that of equation (2).

III. STORAGE FROM PAST RECORDS WHEN ONLY PART OF THE SUPPLY IS USED

We shall now consider the case where the annual water requirement is less than the mean flow of the river, but not less than the minimum recorded annual flow. In this case we have a draft B equal to the requirements and less than the mean M , and we need to know the greatest accumulated deficit S which has to be made up from storage. This can be found for any particular record from the curve of accumulated departures.

Referring to *Figure 1*, OX is the axis of departures from the mean (M). If now we give a draft B less than the mean the storage will each year be increased by $M - B$ over what it was when the draft was M . This can be found from the original curve of accumulated departures by drawing an axis OX_1 , passing through the point F whose ordinate is $-N(M - B)$. The ordinates of the curve referred to axis OX_1 show the changes of storage with the draft B . The storage falls from P to Q and the fall is $Pc + dQ$.

This is the amount of storage S which would have been needed to give the draft B .

S was found for several different drafts for each of 38 phenomena taken from the classes of river discharges, rainfall, and temperature. The results for each class were grouped according to the draft, and the means of these groups have been plotted. Two relations fit the results equally well. The first is

$$\log_{10}(S/R) = -0.08 - 1.00(M-B)/\sigma, \quad (3)$$

and this is shown in Figure 3(a).

The second is

$$S/R = 0.97 - 0.95\sqrt{\{(M-B)/\sigma\}}, \quad (4)$$

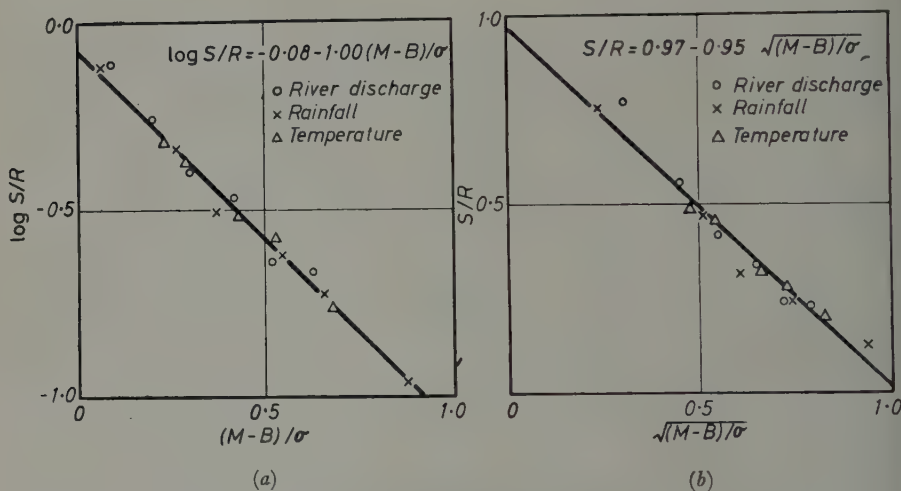


Figure 3. Relation between draft (B) and maximum deficit (S).

which is shown in Figure 3(b). The average value of N from which these results are deduced is 96. It will be seen that as far as closeness of fit is concerned, over the range of observations, there is no significant difference between one type of relation and the other. At some future time it may perhaps be possible to decide that one of the types has some theoretical justification. If the figures are examined it will be noticed that the values from the three classes of phenomena are indistinguishable. This is a further example of the statistical similarity of river discharges, rainfall, and temperature shown by Table 2. Similar relations, but with slightly different constants, have been found for the phenomena with long-term records, Roda Gauge, varves, and tree rings (average $N = 430$).

A feature of the results is that a small reduction of draft below the mean makes a much greater reduction in the storage required to give the draft. For example a reduction of 0.1σ in the draft reduces the storage by 35 per cent. This fact provides a very practical means of applying a factor of safety to compensate for the natural variations of R .

IV. REMARKS ON THE PARAMETER R

Equation (1) giving the mean value of R for a quantity Q whose variation is random has also been derived by Professor W. FELLER⁴ of Princeton University by a more abstruse method. He also states that when N is large the mean value of R is independent of the frequency distribution of Q . It is probable that this applies also to natural phenomena since it is derived from a general theorem of statistical theory. An inference from this is that the difference between equation (2) for natural phenomena, and equation (1) for random events is not due to differences from the normal distribution, but to the occurrence of runs of high or low values leading to greater variation of the means and standard deviations for periods of years than would occur in random distributions. The fact that frequency distributions of many natural phenomena approximate to the normal Gaussian form is not therefore as relevant as the author originally supposed, and the small variability of K (Table 2) is to be taken as a property only remotely connected with the form of distributions.

V. METHODS OF USING LONG-TERM STORAGE. GENERAL REMARKS

The previous investigation dealt with past events, for which complete records exist, and from which conclusions were drawn as to the relations existing between R , σ , and N , and between S , R , and B . The important practical problems to which these relations will be applied are (a) the determination of the size of a long-term storage reservoir, and (b) the means to be adopted to regulate the storage to the best advantage to meet an unknown future.

It may be mentioned that although the approach of the writer to the problem was from the point of view of irrigation, power, and flood-protection, nevertheless there are other matters to which the investigation could be applied, as for example the accumulation of stocks of food, munitions, or other materials. Although a variety of phenomena have provided data it will be convenient to talk of all of it as if it referred to river discharges.

With regard to the size of a reservoir, besides the statistical conditions, there are many other determining factors such as available sites and their capacities, cost in relation to size, how the storage will be used and where the results will be employed, and possible political considerations; or conflicting interests in the use of the water, as for instance agricultural and industrial. The present discussion is confined to statistical considerations, and is based on trial regulations applied to some of the data which were used in the foregoing investigation.

In the work of the author and his colleagues on Nile Projects⁵ the long period of 100 years was taken as the basis of calculations of storage. This was done because of the persistence of low or high values of discharges over periods of years as long as 50 or even more, and because 100 years is a long time to look forward in the life of a project, especially when one considers the present very rapid development of physical and engineering science. The parameter R_{100} is therefore the capacity which has been used as a basis in the schemes of regulation of the draft, and hence of the storage,

which will now be described. It may again be pointed out that equation (2), from which R_{100} is calculated by substituting $N = 100$, gives only a mean value for R_1 , and that generally, if the circumstances of a project permit, the larger the value assumed for the reservoir capacity the better.

The following is taken from ref. 2. The problem which has been investigated first is what system can be applied automatically to guarantee as large an annual draft as possible, but which will not empty the reservoir over a long period of years. Reservoir losses have not been considered, but in some cases in practice would need to be taken into account. A preliminary trial was made with 32 different phenomena by plotting accumulated departures for each record and then calculating $R_{100} = 16.7\sigma$. Using R_{100} as the capacity of the reservoir and starting with the reservoir half-full, if the average discharge for the period was taken as the draft, it was found that the reservoir filled in 66 per cent of the cases and emptied in 59 per cent. Filling or emptying might be prevented either by increasing the value of R or by making the draft variable. If the reservoir was full at the start it emptied in 41 per cent of the cases.

In these cases regulation takes place after the event, using the actual mean and standard deviation of the period. Even so, it is clear that a factor of safety is needed, and still more will this be the case when a mean and standard deviation from the past have to be applied to the future.

VI. REGULATIONS WHICH WOULD BE POSSIBLE IN PRACTICE

To find regulations which would be possible the assumption was made that the first 30 years records were available, and these were used as initial data to form a basis for regulating the remainder of the record, taking account of the additional data as it appeared. The following possibilities were tried:

- (a) The draft was kept constant.
- (b) The draft was varied with the inflow.
- (c) The draft was varied with the amount in the reservoir (content).
- (d) The draft was varied both with inflow and with content.

It was found that with natural phenomena the standard deviation tended to increase with the length of the period, so in calculating R_{100} the standard deviation (σ') was taken as $1.1\sigma_{30}$ (subscripts denote number of years in period). M denotes a mean.

Table 3 shows the results of trying regulations of types (a) and (b). It shows the advantage of the draft varying with the supply, over a draft fixed at M_{30} , and the effect of increasing the starting content, which however decreases as the content becomes larger. A draft M_{10} changing every year is better than one changing every 5 years, both from the point of view of running dry and of wasting water by spilling. In practice if flood protection has to be considered there may be a limit to the permissible draft and consequent amount of spilling and it will be better to start with the reservoir half full.

In the case of Regulation 7 a reduction of the draft of 0.1σ would have

Table 3

Results of regulations based on initial data from 30 years

$$\text{Capacity } R_{100} = 16.7\sigma' = 18.4\sigma$$

Regulation No.	No. of phenomena	Starting content	Draft	Percentage of cases	
				Reservoir fills	Reservoir empties
3	51	$\frac{1}{2}R'_{100}$	M_{30}	44	38
4	51	$\frac{1}{2}R'_{100}$	M_{10} changing every 5 years	23	19
5	51	$\frac{3}{4}R'_{100}$	" " " " "	56	5
6	51	R'_{100}	" " " " "		2
7	51	$\frac{1}{2}R'_{100}$	M_{10} changing every year	12	15

prevented the reservoir emptying in all but 6 per cent. of the cases. A regulation of type (c) where the draft was varied on the basis of reservoir content only was tried in one case, but it was not thought a good enough scheme compared with others to be worth much labour to examine.

In the cases, summarized in Table 3, where there was difficulty in preventing the reservoir from emptying, the variable draft of Regulation 7 was reduced by the application of a sliding scale, depending on the amount of water in the reservoir (Regulation 9). In Regulation 9 the content of the reservoir was divided into 9 parts. When the content was in the middle ninth the draft was M_{10} , in the ninth below the draft was $M_{10} - g$ and so on down to $M_{10} - 4g$, where g is the step of the sliding scale. As a measure of safety against floods the step can also be applied to the upper half of the content. With Regulation 9, in the worst cases the steps g which would have prevented emptying were

$$0.001\sigma', 0.01\sigma', 0.04\sigma', 0.4\sigma', 0.5\sigma', 0.5\sigma' \quad (5)$$

with one other case where an insignificant step would have prevented emptying. The result of Regulation 9 is that in 14 per cent. of cases a sliding scale would be needed to prevent emptying, and in only 6 per cent. would the reduction of draft have been more than trivial. Regulation 9 is probably the type which would be most generally useful when prevention of emptying is the main consideration. The type of regulation, however, depends upon the special circumstances of the case and probably no single type will meet all cases. The choice of a regulation depends on the risk of emptying, the size of the disaster if emptying occurs, and the cost of remedial measures.

The difficult cases have been analysed and in each case the main cause of difficulty was the pronounced reduction of the mean discharge after the regulation had started, which sometimes lasted for 50 years, and this was sometimes assisted by an increase of σ or K .

The variation of draft for 46 of the phenomena used in ref. 2 has been found from the curves of accumulated departures by comparing the lowest 10-year mean with the lowest 30-year mean. Thirty years is a long time in

the life of a farm or a hydro-electric scheme, and covers more than a generation, so it gives a useful standard of comparison. Taking means at 5-year intervals, the results were

	Mean value
(Lowest 10-year mean)/(Lowest 30-year mean)	0.95
(Lowest 10-year mean - 0.1σ)/(Lowest 30-year mean)	0.93

VII. FLOOD PROTECTION

The previous sections deal only with safeguarding against drought. Flood protection requires that the discharge out of the reservoir must not exceed a certain limit. This limit depends on local circumstances, but as an example annual discharges which would be exceeded on the average 1 year in 10, 1 year in 20, and 1 year in 50 have been taken as criteria. Since on the average their frequency distributions are approximately normal the above frequencies roughly correspond to departures from the mean greater than 1.3, 1.7, and 2.1 times the standard deviation.

Regulations 4 and 5 have been carried out on all the phenomena considered in section VI, and the criteria have been applied to those cases in which the reservoir filled. As an example we take Charleston rainfall, which was the most extreme case, and the diagram for which is shown in Figure 4.

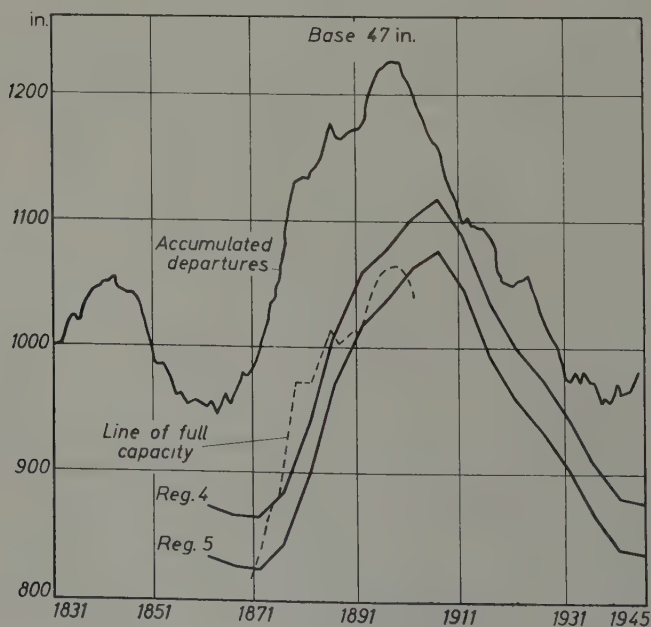


Figure 4.

As already explained the regulations start at the end of the first 30 years. Regulation 4 starts with the reservoir half-full and this content is represented by the initial distance between the regulation curve and the curve of accumulated departures. A dotted line to represent the content when the reservoir is full has been drawn at a distance R'_{100} below the accumulated departures curve. When this line is above the regulation curve the reservoir will be full and the difference between the two curves represents the content which will have to be discharged in excess of the draft, or alternatively stored, in whole or in part, in some extra capacity reserved for flood protection.

Figure 5 shows the time of excess on a larger scale. It also shows lines

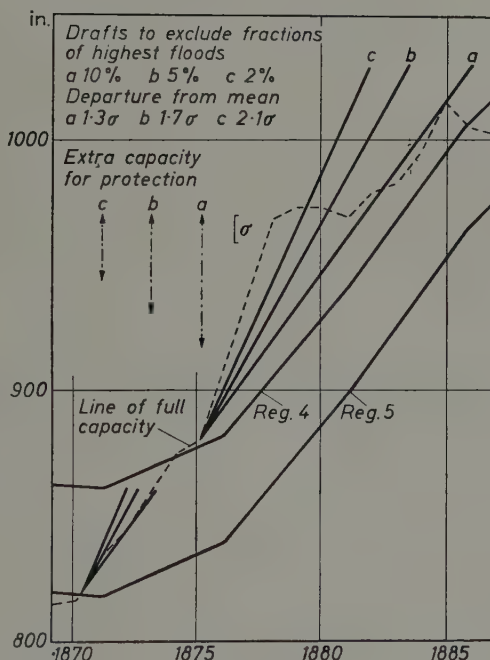


Figure 5.

of draft a , b , and c representing the different permissible limits applied to Regulation 5, but from 1875 the same lines also apply to Regulation 4. The maximum storages required in these cases are

$$(a) 4.7\sigma, (b) 3.5\sigma, \text{ and } (c) 2.3\sigma.$$

The preceding applies to Regulations 4 and 5, which, however, are not the most likely to be adopted. The results of applying a sliding scale to Regulation 7 are given below, where the step is just enough to prevent the reservoir spilling over.

Charleston rainfall was very unusual, as the three highest years occurred in succession and had departures from the mean of 2.9σ , 2.9σ , and 2.8σ . With a purely random distribution a departure of 2.8σ or more would

occur on the average about once in 400 years. In the cases examined Albany rainfall is the only other where departures greater than 2.7σ occurred, and they did so in successive years.

It is interesting to compare the steps in (7) with those in Table 4.

Table 4. Regulation 9

Sliding scales, depending on content, applied to Regulation 7

<i>Phenomenon</i>	<i>Step</i>
Cape Town rainfall	0.0067σ
Charleston rainfall	0.165σ
Helsingfors temperature	0.067σ
Roda gauge A.D. 1341-1440	0.040σ
Trier rainfall	0.0025σ

In the first case the draft is regulated so that the reservoir just empties and does not remain empty, in the second the draft is regulated so that the reservoir just fills and there is no necessity to spill excess water. In both tables the number of cases is nearly the same and the steps of the sliding scale are of the same order in size. It seems legitimate therefore to combine the tables and say that a sliding scale of 0.2σ , reducing the 10-year-mean draft at the smaller contents and increasing it at the larger would leave only 4 cases out of 51 in which the reservoir capacity would have been insufficient.

The above analysis deals only with annual average or total discharges, leaving variations within the year to be considered separately. It is probable that in regard to flood protection, in many cases, individual high floods may be more important than the cumulative effects discussed in the present paper.

VIII. CONCLUSION

An outline of the general theory underlying long-term storage has been given. Each problem, however, must be treated separately, having regard to the practical conditions by which it is governed. The records of the phenomenon which is to be regulated are not themselves sufficient to give a solution. This must also be based, as has been shown, on data relating to similar phenomena. Finally it is to be remembered that, as in most civil engineering problems, the data are not certainties for the future, but only probabilities of varying degrees. They must therefore be dealt with by the recognized methods of statistics, and the factors of safety deducible from these must be applied.

REFERENCES

1. HURST, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs*, Paper 2447, Vol. 116 (1951), p. 770.
2. HURST, H. E. Methods of using long-term storage in reservoirs. Paper 6059, session 1955-6. Institution of Civil Engineers, London.

3. BARNES, F. B. Storage required for a city water supply. *Hydraulic Studies and Investigations*. Reprinted from the Journal of the Institution of Engineers. Australia, 1954.
4. FELLER, W. Asymptotic distribution of the range of sums of independent random variables. *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 22 (Sept. 1951), p. 427.
5. HURST, BLACK and SIMAIKA. *The Nile Basin*, Vol. VII. *The Future Conservation of the Nile*. Physical Dept. Paper No. 51. Ministry of Public Works, Egypt.

